

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

PŘEHLED MODERNÍCH METOD PŘI VÝROBĚ PROTOTYPOVÝCH ODLITKŮ

AN OVERVIEW OF MODERN METHODS IN MANUFACTURING OF PROTOTYPE CASTINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN DRÁPELA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MILAN HORÁČEK, CSc.

BRNO 2009

ABSTRAKT

V bakalářské práci se zabývám přehledem metod Rapid Prototyping, nacházející uplatnění při rychlé výrobě prototypových odlitků. V současné době existuje celá řada metod Rapid Prototyping, uplatňujících se v mnoha oblastech lidské činnosti. V první části je obecný přehled technologií Rapid Prototyping. V druhé části práce se zabývám uplatněním těchto metod v daných oblastech slévárenství.

Klíčová slova

Rapid Prototyping, Stereolitografie, Laser Sintering, Laminated Object Manufacturing, Fused Deposition Modeling, 3-Dimension Printing

ABSTRACT

At bachelor thesis I deal with the survey of Rapid Prototyping methods which could be used for quick manufacturing of prototype foundry. Today number of Rapid Prototyping methods exist which could be used for many human activities. First part of thesis deals with general survey of Rapid Prototyping technologies. Second part of thesis deals with the using Rapid Prototyping methods at foundry.

Key words

Rapid Prototyping, Stereolitografie, Laser Sintering, Laminated Object Manufacturing, Fused Deposition Modeling, 3-Dimension Printing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DRÁPELA, J. *Přehled moderních metod při výrobě prototypových odlitků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 43 s.
Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Přehled moderních metod při výrobě prototypových odlitků vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum: 29.5.2009

.....
Jan Drápela

Poděkování

Děkuji tímto prof. Ing. Miroslavu Horáčkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH**ÚVOD****1 RAPID PROTOTYPING**

- 1.1 Preprocessing
- 1.2 Processing
- 1.3 Postprocessing

2 TECHNOLOGIE VÝROBY MODELŮ

- 2.1 Stereolitografie-SL
- 2.2 Laser sintering-LS a Selective Laser Sintering-SLS
- 2.3 Laminated Object Manufacturing-LOM
- 2.4 Fused Deposition Modeling-FDM
- 2.5 3-Dimensional Printing-3DP
- 2.6 Inkjet technologie

3 VYUŽITÍ METOD RP PRO VÝROBU NETRVALÝCH FOREM

- 3.1 Využití metod RP pro zhotovení matečného modelu
 - 3.1.1 Trvalé modely
 - 3.1.2 Netrvalé modely
- 3.2 Využití metod RP pro přímou výrobu netrvalých pískových forem

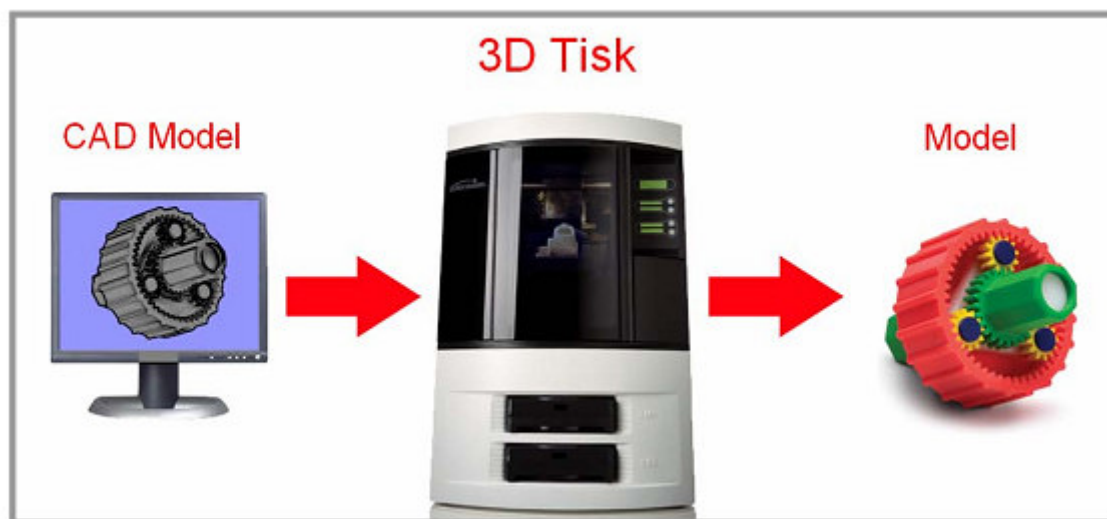
4 VYUŽITÍ METOD RP PRO TECHNOLOGII VYTAVITELNÉHO MODELU

- 4.1 Přímá výroba matečného vytavitelného modelu
- 4.2 Nepřímá výroba matečného vytavitelného modelu
- 4.3 Využití metod RP pro přímou výrobu keramické skořepiny

5 VYUŽITÍ METOD RP PRO TECHNOLOGII VYPAŘITELNÉHO MODELU**6 VYUŽITÍ METOD RP PRO PŘÍMÉ ZHOTOVENÍ TRVALÉ FORMY****7 ZÁVĚR**

ÚVOD

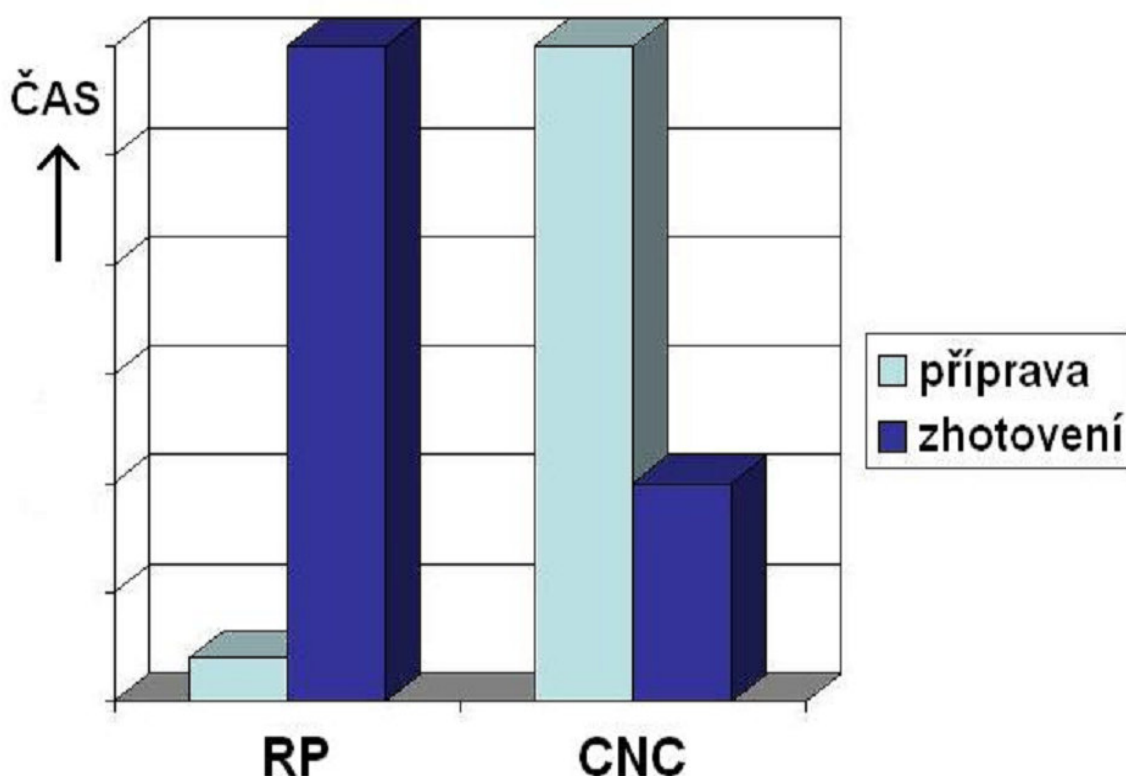
V současné době rozhoduje o úspěšném výrobku několik faktorů. Mezi nejvýznamnější řadíme zejména funkční parametry, ergonomii, design ale také rychlost uvedení výrobku na trh. Funkční prototyp nám umožňuje kontrolovat ergonomii, design, a správnou funkci výrobku. Mezi rozšířené technologie výroby prototypů z kovových materiálů patří zejména třískové nebo abrazivní obrábění a slévárenské technologie. Prototypy z plastových materiálů se nejčastěji vyrábí vstřikováním do forem. Tato technologie výroby plastových prototypů je časově i finančně nákladná a prodlužuje výrazně dobu zavedení výrobku na trh. V dnešní době pronikly plasty do všech oborů lidské činnosti. Plastový prototyp je v dnešní době zásadním bodem při vývoji výrobku. V moderních provozech se velmi často využívají technologie z oblasti *Rapid Prototyping*. Tyto progresivní technologie umožňují rychlou výrobu funkčních prototypů přímo z CAD modelu, a tím výrazně zkrátit dobu od návrhu po zavedení výrobku do výroby. Řada technologií Rapid Prototyping nachází uplatnění také ve slévárenství. Pomocí technologií Rapid Prototyping můžeme vyrábět matečné modely, které dále slouží pro výrobu netrvalé formy nebo pro přímou výrobu trvalých nebo netrvalých forem. V oblasti slévárenské technologie lití na vytavitelný nebo vypořítelný model nachází uplatnění řada těchto metod.



Obr.1: Rapid Prototyping [26]

1 RAPID PROTOTYPING

Rapid Prototyping-RP je progresivní skupina technologií, která vytváří fyzické modely, prototypy a komponenty nástrojů přímo na základě 3D dat. Tato 3D data vznikají často v 3D programových systémech CAD, určených pro konstrukční a návrhové procesy. Pro technologii RP je specifické, že se fyzický model vytváří postupně po jednotlivých vrstvách materiálu. Jednotlivé vrstvy jsou postupně přidávány již k dříve vytvořeným. Na rozdíl od klasických metod obrábění, kdy je materiál postupně odebírán z výchozího polotovaru, je materiál při metodách RP postupně přidáván. Metody RP se především odlišují rozdílným fyzikálním principem při tvorbě jednotlivých vrstev [5]. Problematika co nejrychlejšího a nejekonomičtějšího způsobu zhotovení prvního prototypového odlitku, případně menší série odlitků ověřovacích, je v dnešní době jednou z klíčových činností prakticky všech sléváren [2].



Obr.1: Proces RP ve srovnání s CNC obráběním [5]

1.1 Preprocessing

Do etapy prerocessing řadíme všechny kroky, které souvisí s přípravou dat pro systémy Rapid Prototyping. Patří sem například transformace dat ze systémů CAD do formátu STL, při které dochází i k náhradě geometrického tvaru souborem rovinných plošek. V závislosti na tvaru je CAD geometrie nahrazena se zadanou přesností nezbytným počtem rovinných trojúhelníkových plošek. Pro systémy RP je nezbytné, aby tato síť rovinných plošek dokonale uzavírala objem součásti.

Jak již bylo uvedeno, tvar součásti je tvořen postupně po tenkých vrstvách (0,2-0,05 mm). Proto je nezbytné zabezpečit tzv. podpůrnou konstrukci vrstev pro geometrické tvary, kde vrstvy nejsou samostatné a mohlo by dojít k zborcení nebo deformaci. Tvorba podpůrné konstrukce však není nutná pro všechny metody RP [5].

1.2 Processing

Po generaci 2D řezů, popisujících libovolnou 3D geometrii, nastává vlastní processing – tzn. stavba modelu po jednotlivých vrstvách. Stavba těchto vrstev je velmi úzce spojena s konkrétním fyzikálním principem jednotlivých metod RP [5].

RP metoda	Podpory	Výchozí materiál	Laser	Stavba modelu
SL	Ano	Tekutý polymer	Ano	Vytvrzení vrstvy laserem
FDM	Ano	Drát - plast	Ne	Nanášení vrstvy protlačováním
LS	Ne	Prášek - Plast, Kov	Ano	Spékání laserem
LOM	Ne	Fólie - Papír, Plast	Ano	Laminátování, ořez laserem
3DP	Ne	Prášek - Sádra, Kov, Keramika	Ne	Slepení částic, vytvrzením

Obr.2:Rozdíly metod RP [5]

1.3 Postprocessing

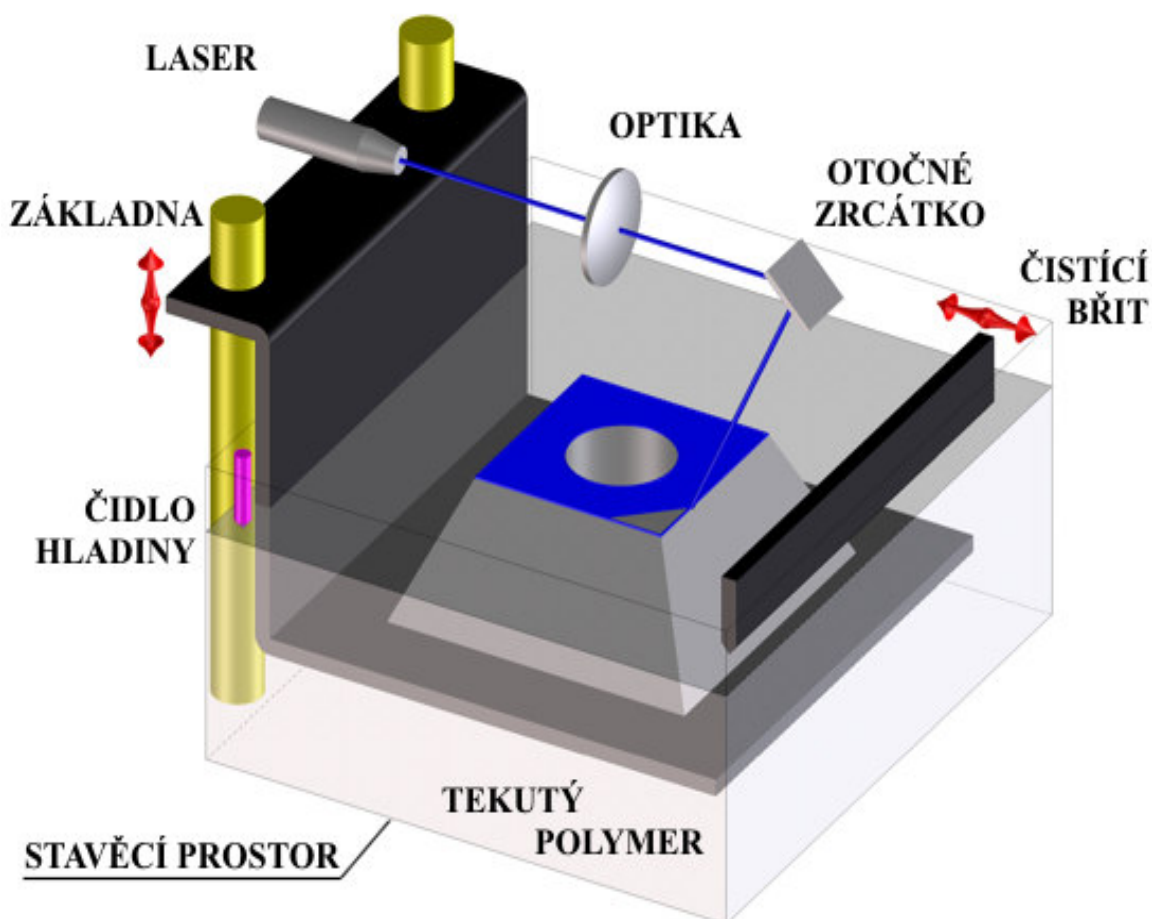
Po vytvoření modelu v systémech RP následuje skupina kroků, které jsme označili jako postprocessing.

První úkolem je součást za zařízení vyjmout. U některých metod je nutno vyčkat i delší čas, než je možno prostor vyráběné součásti zpřístupnit obsluze zařízení. Pokud je prostor součásti obklopen okolním materiálem je nutno materiál odstranit. V závislosti na druhu metody se materiál nejčastěji odsává (práškový materiál) nebo se odstraní oplachem (např. fotopolymer). U některých metod je zhotovený díl křehký a vyžaduje další následné zpracování jako např. vytvrzení dílu UV zářením nebo napuštění dílů další látkou, která zvýší jeho pevnost [5].

2 TECHNOLOGIE VÝROBY MODELŮ

2.1 STEREOLITOGRAFIE-SL

Stereolitografie patří mezi nejstarší metody Rapid Prototyping. První SL zařízení byla vyvinuta společností 3D Systems, Inc., a roku 1987 uvedena na trh. Stereolitografický stroj je složen ze tří hlavních částí: z pracovní komory, řídicí jednotky a opticko-laserového systému. V pracovní komoře je umístěna nádoba s epoxidovou pryskyřicí, ve které se ve směru osy Z pohybuje platforma a nůž zajišťující rovinu pryskyřice v každé vrstvě. Řídicí jednotka obsahuje počítač, který ovládá celý stroj-od nastavení parametrů laseru až po řízení procesu výroby. Poslední část, opticko-laserový systém, se skládá z plynového či pevnolátkového laseru, čoček a soustavy zrcadel pro nasměrování laserového paprsku [3].

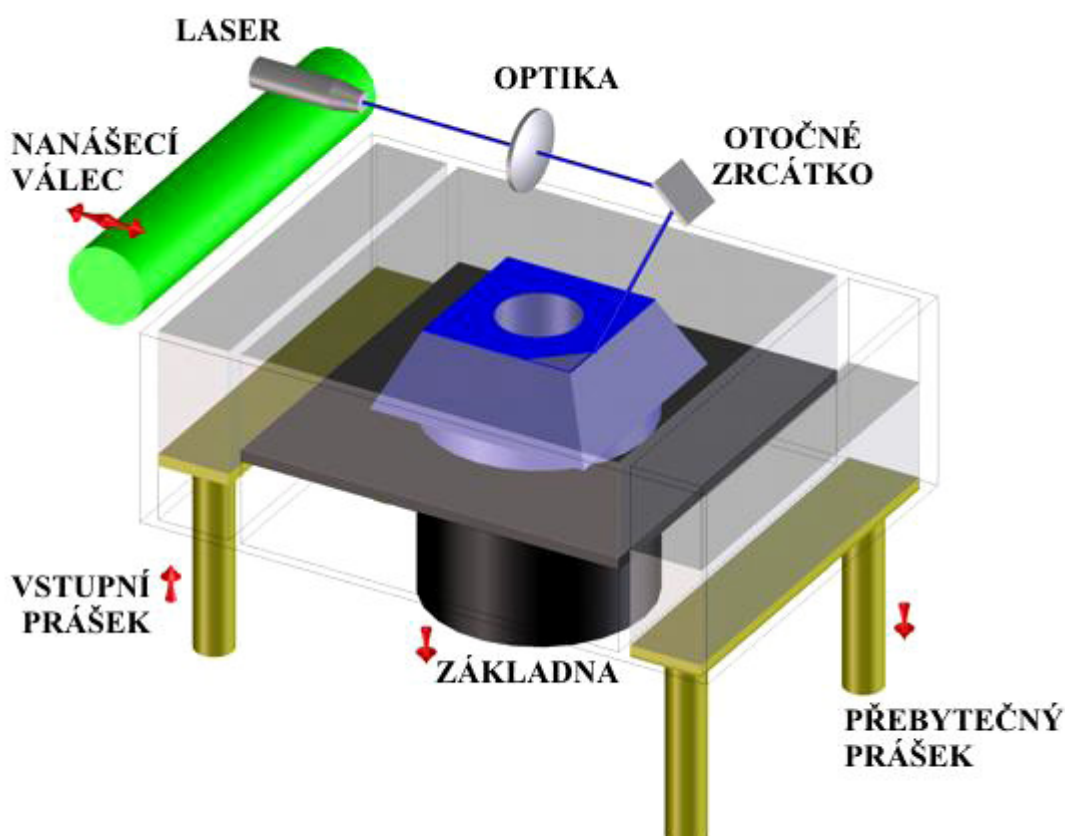


Obr.3:Schéma technologie-Stereolitografie [5]

Před samotnou stavbou na stereolitografu se nejprve počítačový model zbaví případných chyb, jako jsou převrácené trojúhelníky, špatné hrany a tzv.díry v modelu. Poté se určí nejvhodnější poloha modelu tak, aby se minimalizovaly dokončovací práce, vygenerují se podpory a nakonec se vše přeloží do speciálního formátu, v němž je definován tvar jednotlivých vrstev modelu. Tyto vrstvy mohou být silné 0,05 až 0,15mm, což zaručuje dosažení i těchto nejmenších detailů. Stavba stereolitografického modelu je založena na postupném vykreslování 2D vrstev na hladinu pryskyřice laserovým paprskem. V místě dopadu paprsku je pryskyřice vytvrzena a platforma se posune o zadaný krok (vrstvu) v ose Z směrem dolů. Před vykreslením každé vrstvy zarovná nůž hladinu pryskyřice tak, aby byla zachována tloušťka vrstvy. Poté se celý proces opakuje tolikrát, dokud není vykreslena poslední vrstva. Uchycení modelu k platformě je dosaženo výše zmíněnými podporami, které model fixují v dané poloze a zabraňují jeho zborcení. Podpory musí být řešeny tak aby se daly co nejnáze z modelu odstranit a zároveň neovlivnili výslednou kvalitu povrchu. Po skončení stavby (vykreslení poslední vrstvy) se model vyjme a dokonale umyje od nevytvrzené pryskyřice. Na finální vytvrzení slouží UV komora, kde model získá požadovanou pevnost a opracovatelnost. Úloha master modelu vzniklého v prototypové výrobě je velmi různorodá, počínaje designérskou studií, ověřením funkčnosti celé sestavy přes silikonové a vstřikovací formy až po výrobu sádrové formy pro odlitky z hliníkových a hořčíkových slitin. Výhoda stereolitografického master modelu tkví v možnostech povrchového dokončování-od běžného broušení přes pískování až po lakování a leštění. Mezi nejvýznamnější přednosti celé stereolitografie patří zejména rychlost výrobního procesu při udržení vysoké kvality a detailnosti modelu s ohledem na jeho cenu, dále vyhovující přesnost a široké spektrum použití. Důležité je i použití STL v medicíně, kdy se data z tomografu nebo magnetické rezonance převedou pomocí speciálního softwaru na objemový model, který je následně použit při výrobě stereolitografického modelu. Lze tak například zkrátit dobu přípravy komplikované operace nebo usnadnit výrobu náhrady (implantátu) za poškozený kloub [3].

2.2 LASER SINTERING-LS

Metoda Selective Laser Sintering (SLS) využívá spékání práškového materiálu pomocí laseru. Byla vyvinuta na texaské univerzitě v Austinu. Na rozdíl od stereolitografie jsou modely vyrobené metodou SLS velmi pevné. Podstatou SLS je, že paprskem CO₂ laseru je prášek spékán do požadovaného tvaru. Přídavný materiál je nanášen na nosnou desku v inertní atmosféře (dusík nebo argon) po vrstvách. Podle vypočtených souřadnic bodů rovin řezů je řízena XY skenovací hlava, která vede paprsek laseru nad povrchem prášku nasypaného ve vaně. V místě působení laseru se přídavný materiál buď speče nebo roztaví a ztuhne. Okolní neosvícený materiál slouží jako nosná konstrukce. Výroba součástí probíhá po vrstvách. Po vytvoření jedné vrstvy se nosná deska sníží o hodnotu odpovídající hloubce vrstvy. Je možné vytvářet vrstvy tloušťky od 0,02 mm do několika desetin milimetru. Na rozdíl od jiných metod Rapid Prototyping je možné použít jakýkoliv prášek, který se působením tepla taví nebo měkne – například termoplastické materiály, jako jsou polyamidy, polyamidy plněné skelnými vlákny, polykarbonáty, polystyreny, speciální nízkotavitelné slitiny z niklových bronzů nebo ocelové prášky povlakované polymery. Přitom na stejném zařízení většinou nelze přecházet od jednoho materiálu k druhému, neboť jejich vytvrzení si vyžaduje výrazně odlišné podmínky [4].



Obr.4:Schéma technologie – Laser sintering [5]

Podle druhu použitého modelovacího materiálu se v rámci této technologie rozlišují metody:

Laser-Sintering Plastic: součást lze vyrobit z několika druhů plastických materiálů, např. při použití polystyrenu je možné vyrobené součásti využít při metodě lití do ztraceného vosku, při použití nylonu dosahují vyrobené součásti vynikající mechanické vlastnosti, jako tvrdost, houževnatost, teplotní odolnost. Tyto modely jsou proto vhodné pro funkční zkoušky nebo testy potřebného stupně lícování.

Laser-Sintering Formsand: metoda používá jako výchozí materiál upravený slévárenský písek, jehož vytvrzováním je možno bez jakýchkoliv mezikroků vytvořit klasickou pískovou formu pro lití.

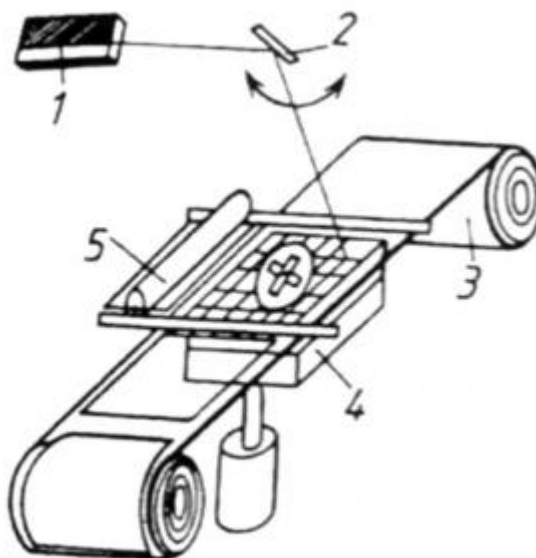
Laser-Sintering Ceramic: jako výchozí materiál se používá prášek spojovaný pomocí tekutého pojiva. Nanášení pojiva je zajištěno pomocí Ink-Jet tryskové hlavy, která je vedena v rovině XY podle předem vypočítaných řídicích údajů. Touto metodou se dají vyrábět součástky z keramického prášku, formy a jádra pro technologii přesného lití.

Laser Micro Sintering: jako výchozí materiál se používá wolfram o velmi malé zrnitosti. Pro spékání prášku se používá Nd:YAG laser o výkonu 10 W. Součást je vytvářena po vrstvách o tloušťce 0,03 mm a dosahuje se kvality povrchu méně než 1,5 μm .

3D Laser Cladding: jako výchozí materiál se používá kovový prášek, který se dodává plynule do stopy dopadu paprsku laseru, kde se taví. Proces probíhá v uzavřené komoře za asistence interního plynu. Vyrobené součásti mají hustotu a mechanické vlastnosti srovnatelné se součástkami vyrobenými konvečními technologiemi. Jako prášku např. při výrobě součástí letadel se používají titanové, niklové, kobaltové a hliníkové slitiny. Pro výrobu náhrad kyčelních kloubů se používá práškový materiál Ti6Al4V, výrobek má stejné hodnoty tažnosti a odolnosti proti únavě jako dosud používané tvářené materiály [4].

2.3 LAMINATED OBJECT MANUFACTURING-LOM

Výchozím materiálem při metodě LOM jsou listy materiálu. V oblasti preprocessingu není nutno generovat podpory. Zhotovené vrstvy jsou při LOM metodě obklopeny oklopeny okolím materiálem, který slouží jako podpora. Pro načtení do systému tedy stačí pouze STL soubor vlastního modelu. Při vlastním LOM procesu jsou jednotlivé vrstvy materiálu na spodní straně opatřeny adhezivní vrstvou materiálu. Materiál je podáván z tzv. nekonečné role z jedné strany stroje na druhou. Pod vlastním materiálem se nachází základna, na kterou se nanáší jednotlivé vrstvy papíru a její svislý pohyb je řízen počítačem. Každá vrstva je přidána k předešlé nahřátím a stlačením materiálu pomocí válce, který se nad vrstvou pohybuje a je zahříván na pracovní teplotu. Obrys, který je převzat z STL dat, je pak pomocí laseru vyřezán do vrstvy právě přidaného materiálu. CO₂ laser působící přes pohybuující se x,y scanner do místa řezu. Na rozdíl od ostatních metod RO, kde se musela vyplnit laserem plocha obrysu, je u LOM generován pouze obrys řezu. Pro odstranění okolního materiálu je však nutno provést rozřezání vnější geometrie na hrubší síť, která po dokončení stavby modelu usnadní oddělení okolní části geometrie. Jak již bylo uvedeno, okolní materiál slouží jako podpora a je oddělen po dokončení stavby. Proto u metody LOM mluvíme často o metodě subtraktivní. Po dokončení stavby je okolní materiál po jednotlivých kostech mechanicky vydrolen od vlastní geometrie modelu [5].



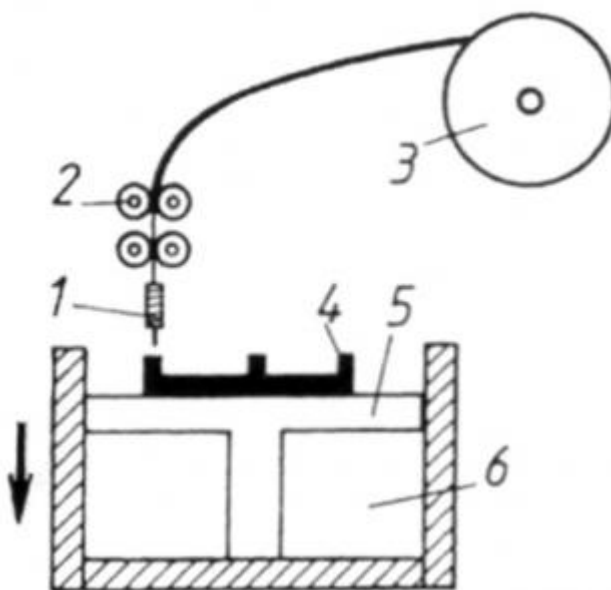
Obr.5: Schéma technologie – Laser sintering [9]

(1 – laser, 2 – zrcadlo, 3 – role fólie, 4 – nosná deska, 5 – vyhřívané přítlačné válce) [9]

LOM model může být pak povrchově opracován, lakován nebo barven. Při použití papíru jako vstupního materiálu takto vytvořený objekt svým vzhledem velmi připomíná dřevěný materiál a může být např. i obráběn. LOM modely mají v praxi široké uplatnění. Díky svému příjemnému vzhledu jsou často používány pro vizuální prezentace nebo jako jádra, např. pro pískové lití kovů. Velmi široké použití je také při výrobě vytavitelných modelů. LOM modely mají poměrně malou smršťivost, takže jejich náhrada za voskové modely je velmi vhodná. Další možné použití modelů je v oblasti výroby prototypových nástrojů metodami vakuového lití do silikonového kaučuku nebo stříkání kovem. Časté je také použití LOM modelů pro nízko objemové vakuové tváření tenkých plastových komponentů [5].

2.4 FUSED DEPOSITION MODELING-FDM

Tato metoda používá jako modelovací materiál tenký drát, který je navinut na kruhové cívice. Vzhledem k tomu, že model je stavěn na podložku do volného prostoru je nutné vytvořit podpory. V části preprocessingu je načtený soubor STL dat zpracován do tenkých 2D řezů. Dalším krokem je vytvoření podpor v oblastech modelu, které nejsou při stavbě z vrstev samostatné. Vlastní proces stavby při FDM je velmi jednoduchý. Drát materiálu je kontinuálně dodáván do nanášecí hlavy, kde se ohřeje na tavicí teplotu. Po ohřátí je roztavený materiál protlačen přes tenkou trysku nanášecí hlavy, která ho pak na základě instrukcí počítače pozivuje v x,y směru do vnitřní plochy 2D obrysu. Materiál ihned při nanesení tuhne a připojí se již k vytvořené vrstvě. Cílem je podobně jako u některých předešlých metod kontinuálně vyplnit vzorem 2D obrys a vytvořit tak souvislou vrstvu. Jakmile je vrstva dokončena, stůl sjede ve směru Z o jednu tloušťku vrstvy dolů a proces se opakuje [5].



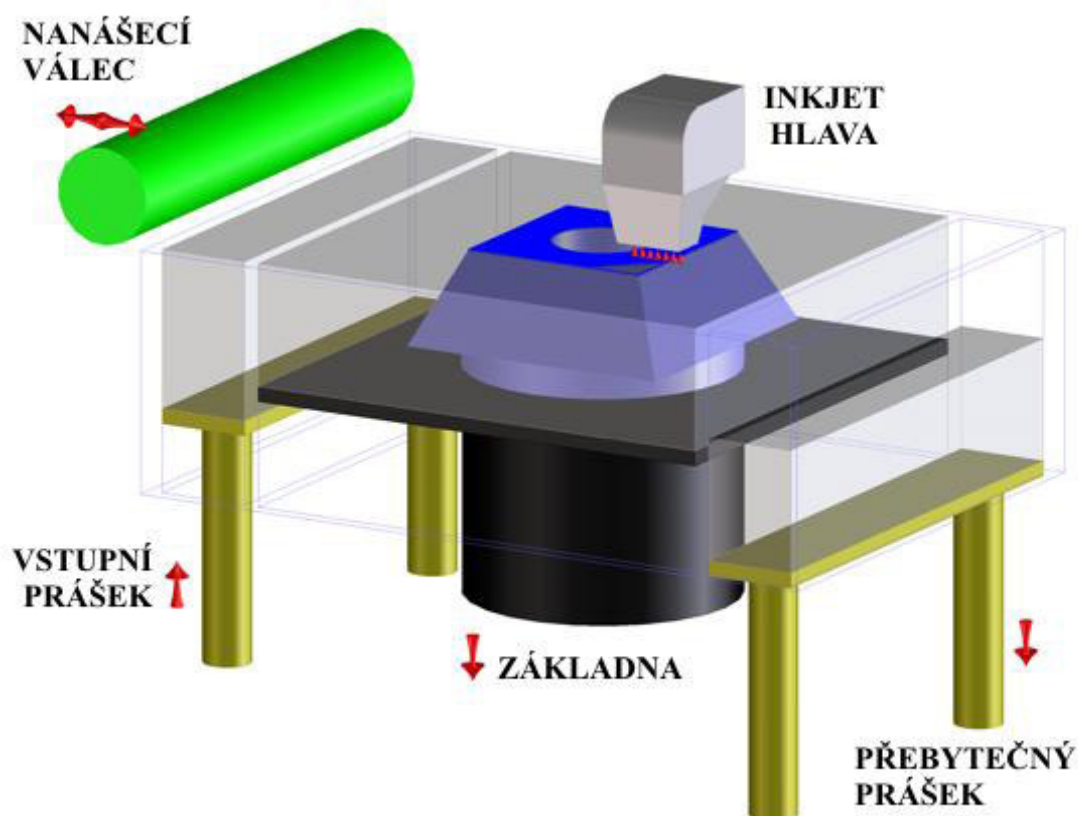
Obr.6: Schéma technologie – Fused Deposition modeling [9]

(1 – tryska, 2 – systém podávání drátu, 3 – zásobník drátu, 4 – obrobek, 5 – nosná deska, 6 – pracovní komora) [9]

Metoda RP Fused Deposition Modeling je vyvíjena americkou firmou Stratasys, Inc. Aby bylo možné oddělit oblast podpor od výsledného modelu používá firma Stratasys svůj patentovaný BASS systém. BASS-Break Away System Support systém používá průtlačnou hlavu, která je vybavena dvěma tryskami. Jedna tryska nanáší modelovací materiál a druhá nanáší materiál podpurný. Oba materiály jsou ve formě drátu a jsou nanášeny dle potřeby do obrysu řezu. Materiály nepřiléhají těsně k sobě a tak se mohou snadno po dokončení modelu oddělit. Další revoluční způsob odstranění podpory představila firma Stratasys nedávno. Systém WaterWorks, jak už napovídá název, pracuje působením vody. Podpora je vytvořena z materiálu, který se působením vodního roztoku rozpustí. Celý proces je navíc doprovázen působením ultrazvuku. Tento automatický způsob odstranění podpory usnadňuje a urychluje postprocessingovou část RP. Nehledě na skutečnost, že podporu je možno jednoduše odstranit z těžko dostupných oblastí (např. geometrie kanálů) a z jemných detailů. FDM systémy firmy Stratasys jsou nabízeny v několika provedeních. Všechny systémy FDM mohou pracovat přímo v kancelářských prostředích bez speciálních požadavků na provoz. Všechny typy zařízení mohou zpracovávat ABS materiál. Tento odolný termoplast je často používán jako materiál koncových výrobků technologie vstřikování plastů. Materiál polykarbonát (PC) využitelný u FDM Titan je velmi mechanicky odolný materiál především pro rázové namáhání. Druhý z této dvojice-polyphenylsulfon (PPSF) – vyniká především odolností na teplotní zatížení. Nedávno uvedený materiál PC-ABS slučuje v sobě vlastnosti obou výše uvedených materiálů. Využitelnost FDM modelů je široká. Modely z ABS jsou často užívány pro oblast funkčního otestování a zkoušky smontovatelnosti. Funkční využití materiálů FDM zvláště rozšiřují nedávno uvedené materiály PC a PPSF. Vzhledem k tomu, že ABS materiál může být dodán v různém barevném provedení, nabízí se jeho využití pro vizuální prezentace. FDM modely ABS materiálu je možno přímo použít pro technologie vytavitelného lití. Modely se mohou použít také při prototypové výrobě nástrojů technologií vakuového lití do silikonového kaučuku [5].

2.5 3-DIMENSIONAL PRINTING -3DP

Metoda 3DP byla vyvinuta na Massachusetts Institute of Technology-MIT a užívá jako výchozího materiálu různé druhy prášku. Tato metoda velmi připomíná proces laser sintering, ale na rozdíl od ní se laserová hlava nahradí inkjetovou hlavou. Popíšeme si stručně, jak tato metoda pracuje. Proces probíhá v komoře válcovitého tvaru s pohyblivým pístem. V tenké vrstvě je ze zásobníku na základnu rovnoměrně nanášen práškový materiál. Rotující válec nanáší tenkou vrstvu práškového materiálu a pohybuje se v prostoru mezi dvěma kazetami. Inkjetová hlava, která se pohybuje rastrovým způsobem v rovině xy, vystřikuje pojivo na vybranou oblast jedné vrstvy práškového materiálu. Toto pojivo pak spojuje částice práškového materiálu a vytváří tuhou hmotu jedné vrstvy. Když je vrstva dokončena, posune se válec o tloušťku jedné vrstvy. Po zhotovení modelu se válec vysune a okolní zbylý materiál se odstraní od modelu zelené barvy. Model je následně napuštěn tvrdidlem pro zvýšení jeho pevnosti před dalším užitím [5].



Obr.7: Schéma technologie – 3-Dimensional printing [5]

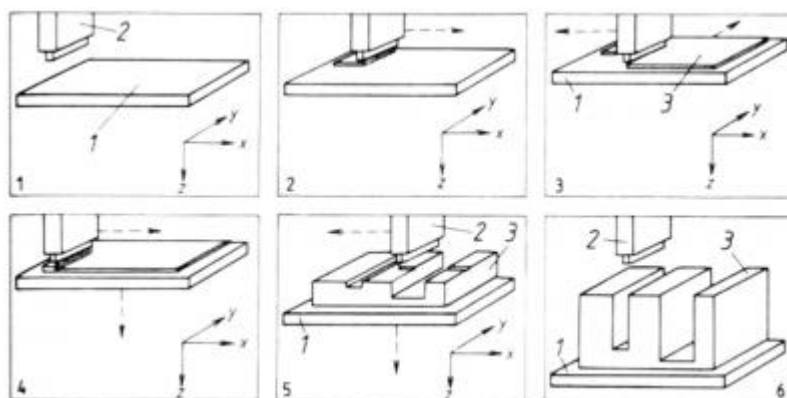
2.6 INKJETS TECHNOLOGIE

Thermal Inkjets

Tato technologie byla v minulosti nazývaná Ballistic Particle Manufacturing (BPM). Technologie využívá principu inkoustových tiskáren. Je založena na tlakovém nanášení materiálu (termoplastu) ve formě kapek a jejich následném vytvrzení. Nanášení materiálu je docíleno tím, že jednotlivé malé kapky materiálu jsou vystřelovány z tlakové hlavy na pracovní plochu a tam bezprostředně po dopadu vytvrzeny. Cíleným nanášením dalších kapek na už nanesený materiál se vyrobí celá trojrozměrná součást. Technologie BPM pracuje pouze s jednou tiskovou hlavou, která má 5 stupňů volnosti. Tato metoda umožňuje vytvářet modely bez podpůrné konstrukce [9].

Photopolymer Inkject

MJM je další technologií Rapid Prototyping společnosti 3D Systems, Inc. Její vývoj započal v roce 1994. Jedná se o tisk vrstev pomocí termopolymeru. Princip technologie spočívá v nanášení jednotlivých vrstev termopolymeru postupně na sebe pomocí speciální tiskové pracovní hlavy, která má 96 trysek, uspořádaných rovnoběžně vedle sebe. Množství nanášeného materiálu je pro každou trysku samostatně řízeno programem. Součást se opět vytváří na zvláštní nosné desce podobně jako u stereolitografie. Pracovní hlava se pohybuje nad nosnou deskou ve směru osy. Je-li součást širší než pracovní hlava, posouvá se ve směru osy tak, aby se vytvořila celá součást. Velký počet trysek zaručuje rychlé a rovnoměrné nanášení materiálu. Nanášený termoplastický materiál ztuhne při styku s už naneseným materiálem téměř okamžitě [9].



Obr. Schéma zařízení pro technologii MJM
(1 – nosná deska, 2 – pracovní hlava, 3 – vyráběná součást) [9]

3. VYUŽITÍ METOD RP PRO VÝROBU NETRVALÝCH FOREM

K zhotovení formy je nutné modelové zařízení (model a jaderníky), jehož pomocí se dosáhne žádaných tvarů odlitku. Odlitky odléváme převážně do netrvalých jednorázových forem (z písku nebo keramické směsi) nebo do forem trvalých (kovové kokily). Při odlévání do netrvalých forem je nutný model odpovídající svým tvarem vnějšímu povrchu odlitku, který se vytvoří jeho zaformováním a opětovným vytažením z formovací směsi (model je pozitiv, forma negativ a odlitek opět pozitiv zmenšený o smrštění). Vnitřní dutiny odlitku se vytvoří jádrem, které je nutno zhotovit ve zvláštních jadernících [7]. Aplikací metod RP lze zhotovovat přímo matečné modely, které jsou vhodné k zaformování do formovací směsi. Mezi tyto metody řadíme zejména technologii FDM, LOM, LS. Dalším využitím metod RP je přímá výroba netrvalé pískové formy bez použití matečného modelu. Mezi tyto technologie řadíme zejména technologii LS.

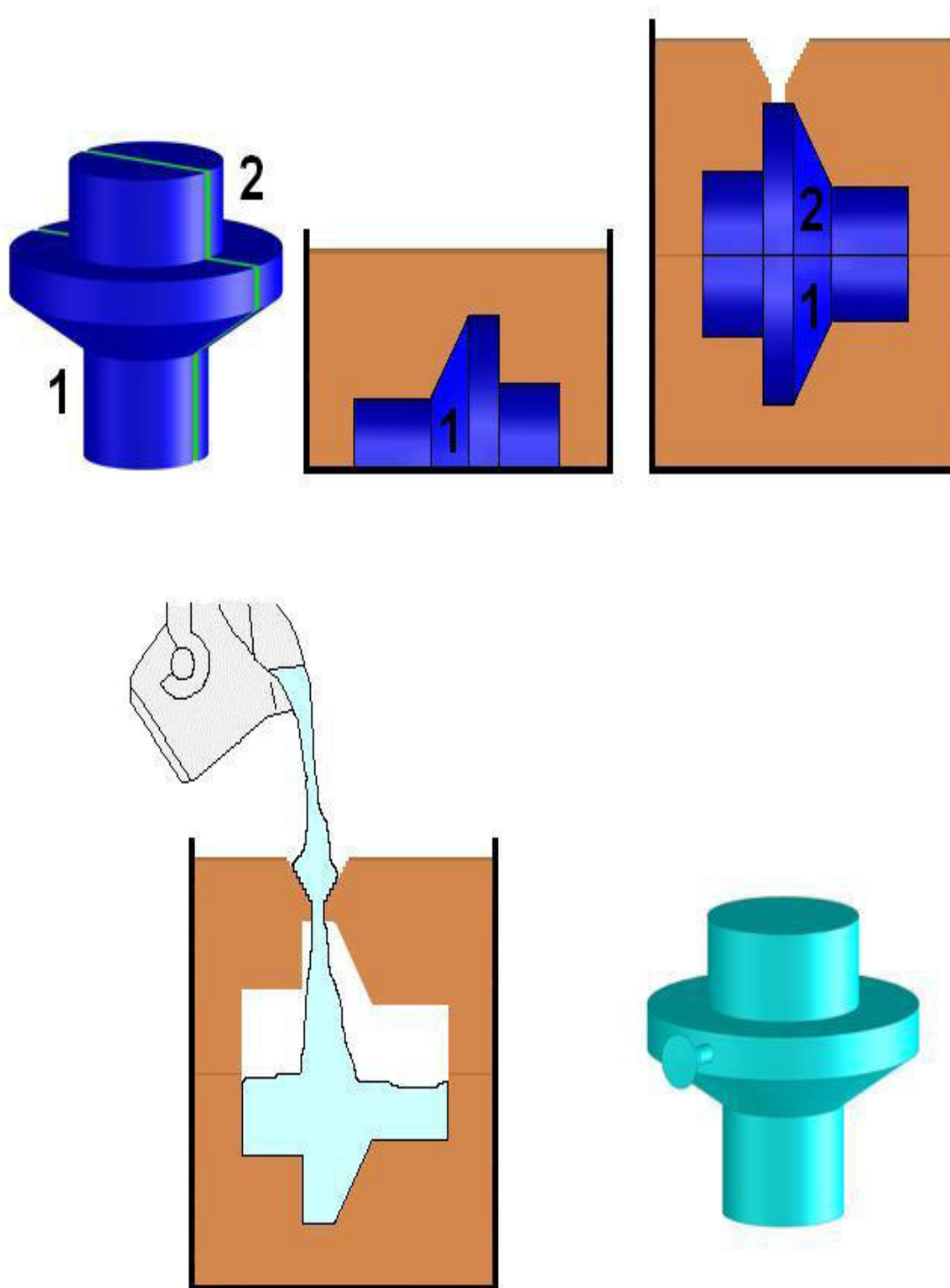
3.1 Využití metod RP pro zhotovení matečného modelu

Základními podklady pro výrobu modelového zařízení jsou postupový výkres a objednávka. Podle zvolené technologie, objednaného množství odlitků a předepsaných požadavků (přesnost, hladkost) se volí materiál modelového zařízení. Pro malá množství odlitků a nenáročné požadavky se používá modelových zařízení se snadno obrobitelných materiálů (např. dřevo), které však mívají krátkou životnost [5]. Metodami RP můžeme přímo vyrábět *trvalé* nebo *netrvalé* mateční modely, který se dále použijí pro výrobu netrvalé jednorázové formy.

3.1.2 Trvalý model

Aplikací metod RP lze zhotovovat přímo trvalé matečné modely, které jsou vhodné k zaformování do formovací směsi a to zejména technologií FDM, LOM, SL.

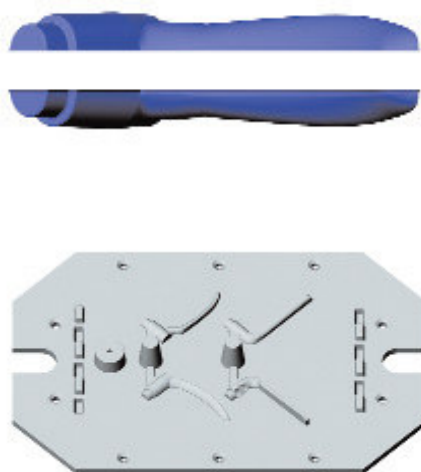
Je nutné 3D data doplnit o úkosity a velikost smrštění. Dále je nutné rozdělit 3D model podle dělicí roviny na spodní / horní část modelu, který se pak postupně formuje do spodního / horního formovacího rámu s následným umístěním vtoku [5].



Obr.9: Schéma technologie lití do netrvalých forem [5]

Technologie FDM používá univerzální termoplasty ABS, a to zejména PC (polykarbonát) a PPSF (polyfenylsulfon), které jsou díky svým technologickým vlastnostem vhodné pro použití v pískovém lití. Tyto termoplasty jsou odolné proti tlaku při pěchování písku, a zvláště pak PC a PPFS proti otěru a chemickým látkám v písku. Tyto vlastnosti velmi pozitivně přispívají k prodloužení životnosti modelového zařízení. Díly zhotovené technologií FDM mohou být užity ve slévárenství následujícími způsoby.

Jednou z možností je přímé využití modelu např. z PC pro formování v rámech. Další možností pro přímé využití modelu z PC je strojí formování. Podobně jako při předešlém kroku je model rozdělen na dvě poloviny, kdy horní část je připevněna k horní straně formovací desky a spodní část modelu k spodní straně nebo na další formovací desku. Zpravidla se na desku připevní několik modelů z PC včetně vtokové soustavy a ostatní elementy, jako např. vtokový kůl, mohou být předpřipraveny jako polotovary, což urychlí přípravný proces [6].



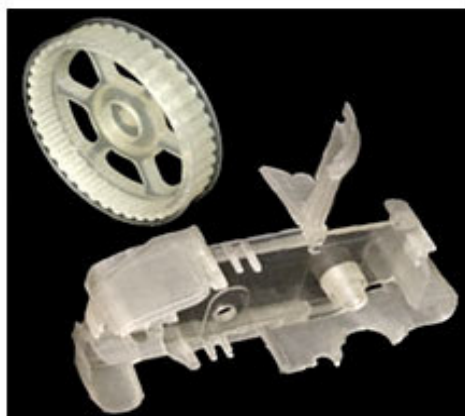
Obr.10: Schéma přípravy formovací desky [6]

Pomocí 3D výrobních systémů Fortus, které mohou být provozovány v běžné kanceláři, mohou slévárenské firmy vytvářet velmi flexibilně modely v bezobslužném provozu (v případě FORTUS 900mc až do velikosti 914x 610x910 mm). Celý proces zhotovení formovací desky může být tímto způsobem redukován do několika dní, a tak podstatně zkracuje celou přípravu výroby ve srovnání z klasickým postupem realizovaným nejčastěji zakázkově. V neposlední řadě je možné model přímo využít (např. z materiálu ABS-M30) ke zhotovení jaderníku pro formování pískových jader [6].

Metoda LOM-Laminated Object Manufacturing je původní metoda firmy Helosys a jejím pokračovatelem je americká firma Cubic Technology Inc., která nabízí dva systémy založené na metodě LOM. LOM 2015 umožňuje vytvářet modely zhruba do velikosti 380 x 250 x 350 mm a druhý model 2030H je určený pro rozměrové modely do velikosti 812 x 560 x 510 mm. Váha modelu může být u druhé velikosti stroje až do 200 kg. Pro oba stroje jsou dostupné následující materiály: základní-s využitím papíru LOMPaper, dále plast LOMPlastic a kompozitní materiál LOMComposite. Poslední uvedený materiál je podstatně pevnější, neboť obsahuje prvky na bázi skleněného vlákna [3]. Americká firma Solidimension nabízí 3D tiskárnu SD 300(obr.), která využívá technologii LOM. Zařízení má pracovní prostor 160 x 210 x 135 mm a zpracovává materiál PVC z role v zásobníku tiskárny [8].



Obr.11: 3D tiskárna SD 300 [8]



Obr.12: LOM modely [8]

Model vyrobený technologií LOM může být dále povrchově opracován, lakován nebo barven. Technologie LOM je vhodná pro stavbu velkých a rozměrově nenáročných modelů. Výhodou technologie LOM je rychlá stavba modelů. Mezi nevýhody patří zejména množství odpadů a horší kvalita povrchů. Upravené modely získané technologií LOM lze aplikovat k výrobě netrvalých pískových forem.

Další technologií RP, nacházející uplatnění v oblasti výroby trvalých modelů, je technologie LS. Německá firma EOS distribuje své systémy pod označením EOSINT založené na metodě LS. EOSINT 390 umožňuje vyrábět modely od 340 mm x 340 mm x 620 mm.

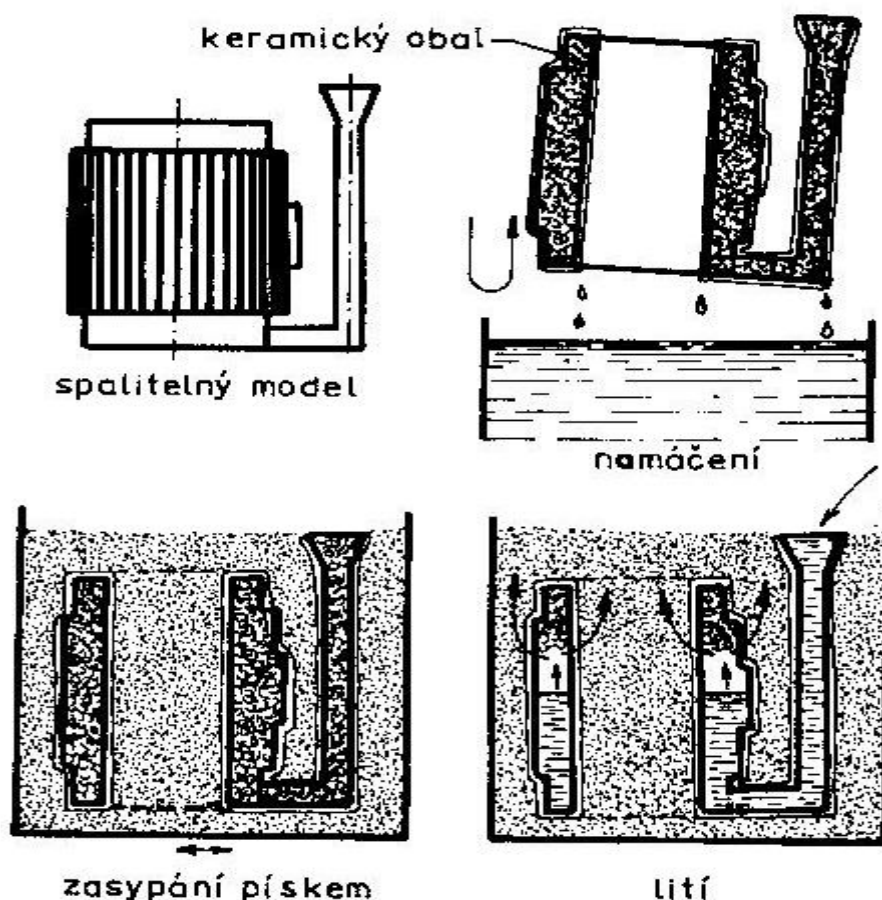


Obr.13: Zařízení EOSINT 390 [10]

Systém EOSINT 390 zpracovává např. materiály PA 2200, PA 3200GF, Alumide. Základem těchto materiálů je polyamid PA12. V případě materiálu PA 3200GF a Alumide je kombinován polyamid PA12 se sklem nebo hliníkem, což má za následek zvýšenou pevnost vyráběných modelů. Výhodou metody LS je absence podpor, a velmi dobrá rozměrová přesnost vyráběných modelů. Nevýhodou v oblasti použití LS modelů k výrobě netrvalých pískových forem je jejich porézní povrch. Dále je také tato technologie časově náročnější než například FDM nebo SLA. Vzhledem k velmi nákladnému provozu LS zařízení je použití LS modelů pro výrobu netrvalé pískové formy spíše ojedinělé.

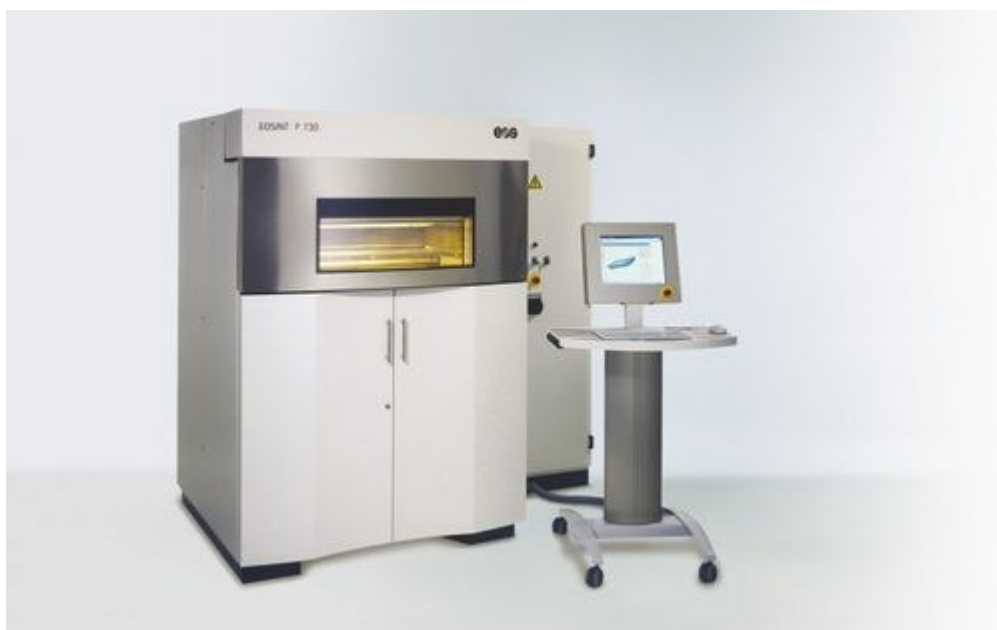
3.1.2 Netrvalý model

Netrvalý model se využívá u metody lití na spalitelný model. Při této metodě lití se model zhotovuje z pěnových plastů, nejčastěji z pěnového polystyrénu. Původně se spalitelné modly zaformovaly klasickým způsobem. Nověji se na model nanáší vrstvička žáruvzdorného nátěru, po jehož zaschnutí se model v rámu zasype suchým pískem. Dokonalé vyplnění formovacího rámu při tom usnadňuje vibrace. Během lití se plast vypařuje před postupujícím žhavým kovem, který pak vyplňuje vznikající dutinu. Uvolněné plyny při tom unikají díky dobré prodyšnosti pískové výplně [11].



Obr.14: Schéma technologie lití spalitelného modelu [11]

Metoda umožňuje lití tvarově složitých dílů bez nutnosti vyjímání modelu. Odpadá tedy potřeba úkosů, úprav dělicí roviny, vnějších jader a komplikovaného formování. Spalitelné modely se používají jak v kusové výrobě (tvářecí nástroje, díly prototypů) tak i v sériové výrobě obtížně formovatelných odlitků (tělesa a díly elektromotorů). Spalitelnými částmi je možné doplnit i modely dřevěné či kovové pro vytváření výstupků, kulových nálitků apod. [11]. Pro výrobu netrvalého modelu, který lze dále použít pro výrobu netrvalé formy, nachází uplatnění technologie LS. Německá firma EOS nabízí zařízení EOSINT P 730, které může vyrábět modely do velikosti 700 mm x 380 mm x 580 mm.



Obr.15: Zařízení EOSINT P 730 [12]

Zařízení umožňuje vyrábět netrvalé modely ze speciálního tvrdého polystyrénu nazývaného PRIMECAST. Model vytvořený z toho materiálu je možno použít jako vypařitelný model. V řádu hodin tak máme k dispozici model pro zaformování včetně vtokové soustavy. Modely mohou být postaveny s různým procentem smrštění [13].

3.2 Uplatnění technologií RP pro přímou výrobu netrvalých pískových forem

Dalším novým přístupem je použití metod RP k přímému zhotovení pískových jader a forem. Tyto metody zaznamenávají opravdu revoluční převrat ve výrobě forem pro pískové lití. Jedním z představitelů této technologie je německá firma EOS. Jejich největší RP systém EOSINT S 750, pracující na základě sinteringu, umožňuje tvorbu kompletních pískových forem až do velikosti 720 x 380 x 380 mm [5].



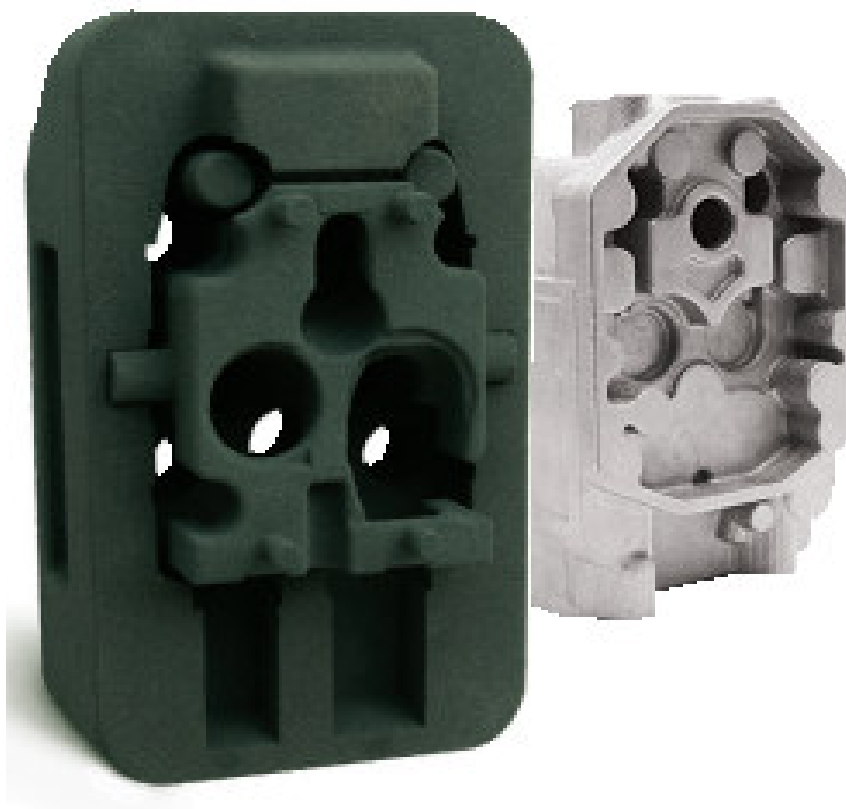
Obr.16: Zařízení EOSINT S 750 [16]

Při výrobě formy nejsou vyžadovány žádné modely a jádra, neboť i extrémně složité formy jsou založeny na výrobě po vrstvách. To znamená, že konstrukce formy se velmi zjednoduší především v jejím konečném procesu montáže. EOSINT používá několik licích písků, které mají podobné vlastnosti jako řada písků standardně používaných. Tyto písky pracují na bázi spékání písku, a to postupně jednu vrstvu po druhé. Tímto způsobem je samozřejmě možné vytvářet podřezané a vnitřně zakřivené tvary, které bychom pomocí konvenčních metod nikdy nevytvořili [5].



Obr.17: Model vyrobený zařízením EOSINT S 750 [16]

Dalším představitelem přímé výroby pískových forem za použití LS je německá firma ProMetal RCT, která distribuuje zařízení S-15 umožňující zhotovit pískové formy až do velikosti 1500 x 750 x 700 mm



Obr.18: Forma vyrobená zařízením S-15 [15]

4 VYUŽITÍ METOD RP PRO PŘESNÉ LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL

Patří mezi nejstarší slévárenské technologie i když se v období průmyslové revoluce na ni zapomnělo a až v moderní době získal dnešní podobu tzv. přesného liti, která umožňuje odlévat i složité díly bez obrábění na čistý tvar. Ze snadno tavitelného materiálu (vosk) se do kovové formy vstříkne nebo odlije přesný tvar odlitku s přídavkem na smrštění. K takto vzniklému modelu se připojí vtoková soustava a nálitky. Obvykle se pro více odlitků používá společný licí kúl a společný náletek, čímž vznikne „licí stromeček“.

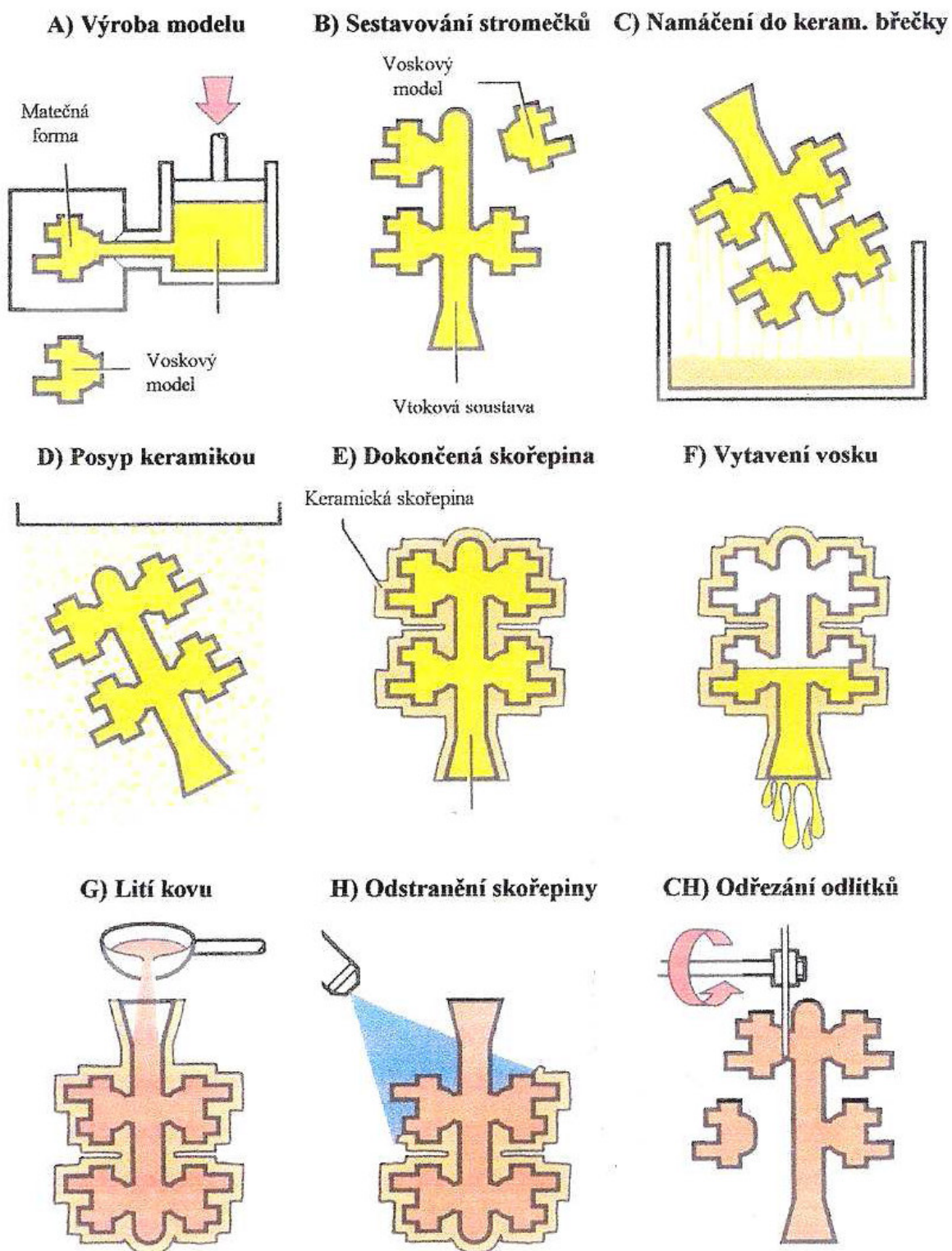
Cela sestava se ponoří do obalové hmoty, která vznikne rozmícháním křemenné moučky ve zvlášť připraveném etylsilikatu. Po vyjmutí se ulpěla kašovitá hmota zasype hrubším pískem a nechá se asi jeden den zatvrdnout. Tím vznikne na modelu tenká skořepina. Podle hmoty odlitku se celý postup 4krát až 8krát opakuje, až vznikne obal o tloušťce asi 3 až 10mm.

Model se z obalu odstraní buď vytavením nebo (rozpuštěním ve vařící vodě) čímž vznikne forma. Tato forma je buď samostatná nebo se u těžších odlitků zpevňuje zasypáním pískem či zalitím cementovou kaší. Zbytky organických látek se odstraní vyžeháním při 900 až 1000°C. Ihned po vyjmutí z pece se do ještě žhavé formy odleva, takže roztavený kov vyplní i nejtenčí průřezy (obr.10h). Po odlití se skořepina odstraní oklepáním, otryskáním jemným tryskacím materiálem nebo rozpuštěním v roztaveném louhu.

Pro usnadnění výrobního postupu se někdy místo jednotlivých modelů odlévají nebo lisují modely celých „etáží“, které se pak přímo skládají do stromečku (obr.10b). Metodou přesného liti lze dosáhnout vynikající přesnosti a hladkosti odlitku, takže odlitky potřebují jen minimální obrobení. Zvlášť výhodně se uplatňuje metoda přesného liti u nesnadno obrobitelných materiálů nebo u součástí velmi složitěho tvaru. Typickými příklady jsou lopatky nebo celé věnce pro spalovací turbíny, řezné nástroje z rychlořezných kovů, součásti šicích a textilních strojů, zbraní, měřicích zařízení apod. [7].

Výroba voskových modelů je zdoluhavá a vyžaduje často použití další technologie (například obrábění), neboť tvary mohou být velmi komplikované a přesné. Pomocí některých metod RP, dnes můžeme přímo vyrobit voskové modely za použití stejných nebo blízkých voskových materiálů. Metoda vytavitelného lití patří mezi nejznámější technologie lití. Tato technologie je založena na existenci voskového modelu, který je základním modelem pro vytvoření keramické směsi. Tato směs po tepelném zpracování vytvoří skořepinový obal pro konečný kovový materiál.

Použitím metod RP pro výrobu voskových modelů dosáhneme velkých finančních a časových úspor. Materiálů, kterými je možné nahradit voskové modely, se v oblasti RP nabízí více. Dalším možným způsobem je vytvoření silikonové formy na základě RP modelu pro opakované zhotovení voskových modelů použitelných pro vytavitelné lití. Některé metody RP umožňují přímé vytvoření keramické skořepiny [5].



Obr.19: Schéma technologie lití vytavitelného modelu [7]

4.1 Přímá výroba matečného (vytavitelného) modelu

Zařízení firmy Solidscape užívá ke stavbě plastový a voskový podpurný materiál. Materiály jsou udržovány v zásobnicích, které jsou udržovány vlivem teploty v tekutém stavu. Tyto materiály jsou dopravovány do tryskací hlavy přes tepelně izolované vedení. Tryskací hlavy stříkají drobné kapičky na podložku a jsou postupně posouvány dle geometrie řezu do požadovaného místa. Když je celá vrstva vyplněna, frézovací hlava pak zarovná vrstvu do přesné tloušťky. Systém pak pokračuje vrstvu po vrstvě až je celý objekt postaven. Následně je pak podpurný voskový materiál vystaven. Nejvýraznější charakteristikou systému Solidscape je schopnost vyrobit extrémně jemné detaily a drsnost povrchu. Ačkoliv je vhodnější na stavbu menších dílů. Vyrobené díly jsou velmi křehké. Využití této metody je možné pro koncepční modely, aplikace přesného lití pro průmyslové a umělecké díly-zvláště šperky. Systém je hlučnější vzhledem k frézovací hlavě [18]. Firma Solidscape nabízí zařízení R 66, které může vytvářet modely do velikosti 152.4 x 152.4 x 101.6 mm. Tloušťka vrstvy nanášeného modelovacího materiálu se pohybuje od 0.013mm do 0.076mm. Minimální velikost detailu uvádí firma Solidscape 0,254 mm. Tiskárna D76 tedy vyrábí modely s velmi jemnými detaily. Zařízení D76 nachází uplatnění zejména ve výrobě modelů po výrobu zubních implantátů dále také v oblasti bižuterie .



Obr.20: Zařízení R66 [27]

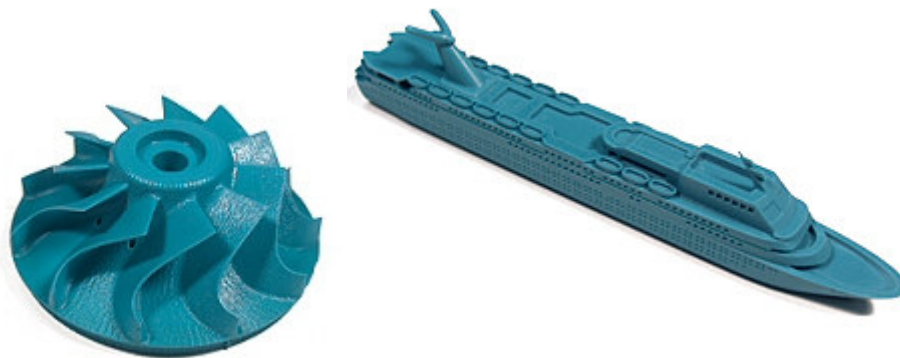


Obr.21: Voskové modely [27]



Obr.22: Odlitky pro bižutérii [27]

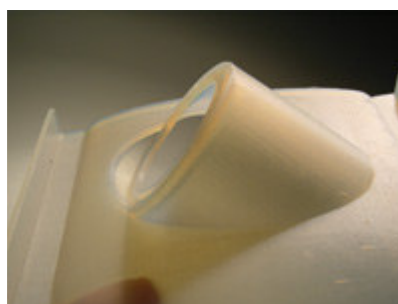
Zařízení T612 Benchtop je dalším z nabízených zařízení firmy Solidscape. T612 Benchtop umožňuje vytvářet modely do velikosti 304.8 x 152.4 x 152.4 mm. Tloušťka vrstvy nanášeného modelovacího materiálu se pohybuje od 0.013mm do 0.076mm. Minimální velikost detailu uvádí firma Solidscape 0,254 mm.



Obr.23: Modely vyrobené zařízením T162 Benchtop [23]

4.2 Nepřímá výroba matečného vytavitelného modelu

V oblasti nepřímé výroby matečného vytavitelného modelu nachází uplatnění zejména RP technologie SLA, FDM a Inkjet. Modely vyrobené technologií SLA mají velmi dobrý povrch a nevyžadují povrchovou úpravu.



Obr.24: Detail povrchu SLA modelu [19]

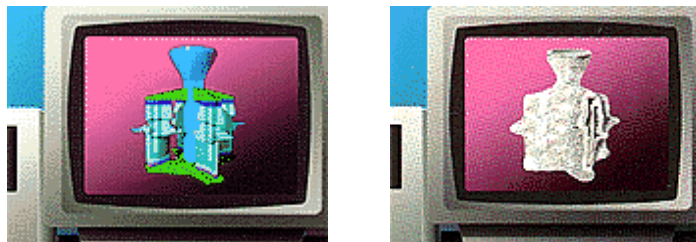
..

Pro zhotovení menší série voskových modelů (od 10 do 50 kusů) se nabízí využití SLA modelu jako matečného modelu pro vytvoření dutiny formy ze silikonového kaučuku ve vakuu. Do této dutiny formy se pak ve vakuu následně odlévají voskové modely využitelné v přesném lití. Proces lze realizovat průměrně v několika dnech a cena za tuto službu představuje pouze zlomek ceny pro zhotovení hliníkových forem.

ABS díly, zhotovené v systémech firmy Stratasys, jsou pevné a v čase rozměrově stálé, takže mohou být bezproblémově použity pro opakované zaformování. Povrch ABS dílů je možné před zaformováním upravit běžnými postupy. Firma Stratasys nedávno uvedla novou a velmi efektivní metodu k úpravě povrchu všech ABS používaných materiálů. Po aplikování poloautomatického postupu ve FORTUS Finishing Stations je možné kvalitu povrchu dílů z ABS materiálu přiblížit kvalitě povrchu vstřikovaných dílů, a to ze zanedbatelným vlivem na změnu a geometrii [5].

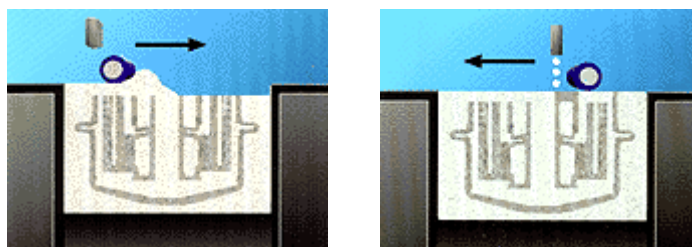
4.3 Využití metod RP pro přímou výrobu keramické skořepiny

Dalším využitím metod RP v oblasti lití na vytavitelný model, je možnost přímé výroby keramické skořepiny. Firma Soligen Technologies Inc. (USA) nabízí zhotovení skořepiny na základě metody 3DP [5]. Pomocí CAD systémů je tvořen 3D model odlitku včetně vtokové soustavy a skořepiny.



Obr.25: Tvorba 3D skořepiny [24]

Skořepina je tvořena technologií DSPC (Direct Shell Production Casting). V prvním kroku je nanášen po vrstvách keramický prášek. V druhém kroku je do keramického prášku vstřikováno pojivo.



Obr.26: Schéma technologie výroby skořepiny [24]

Po zhotovení je skořepina zbavena materiálu z dutiny skořepiny vytavením [5].



Obr.27: Vytavení skořepiny [24]



Obr.30: Skořepina s jádrem vyrobená technologií DSPC [25]

5 VYUŽITÍ METOD RP PRO TECHNOLOGII VYPAŘITELNÉHO MODELU

Technologie lití na vypařitelný model je založena na stejném principu jako technologie lití na vytavitelný model. Místo voskového modelu je zde použit matečný model vyrobený z různých materiálů. S tímto modelem se dále pracuje tak jako s voskovým.

Materiálů, kterými je možné nahradit voskové modely, se v oblasti RP nabízí více. Jednou z nejznámějších a používaných postupů je metoda firmy 3D systéme-QuickCast. QuickCast je metoda, kterou se v systémech SLA vytváří vytvrzováním model, který se vyznačuje uvnitř polosytou strukturou. Tento model je pak úspěšně použit místo voskového modelu. Použitím vhodného polymeru se dosáhne velmi tvarově přesných dílů, které mají samozřejmě pozitivní vliv na kvalitu kovových prototypů [5].

SL proces vytváří 3D objekty ve foto citlivé epoxidové pryskyřici užívající skenovací laser který postupně vrstvu za vrstvou vytvrzuje vybranou oblast do pevného stavu. SL díly mohou být stavěny jako plné díly (užitím ACES™ stavěcího stylu) nebo jako poloduté díly s vnitřní šestihranou strukturou známou jako QuickCast™ [1].

QuickCast™ stavěcí styl byl vyvinut k tomu, aby SL díly mohli být užity jako matečné modely pro metodu vytavitelného modelu. Takto připravené SL díly se při vytvrzení skořepiny vypálí a tím snižují možné prasknutí keramické skořepiny vlivem teplotního namáhání vzniklého z roztažnosti modelu [1].

QuickCast™ díly nejsou z plného materiálu takže užívají méně materiálu a méně času pro laserové skenování než plné díly, ačkoliv tekutá pryskyřice která zůstává uvnitř struktury musí být po stavbě následně vyčištěna. Vyčištění se může zdát problematické, speciálně pro velké díly a tenké průřezy, kde vlivem viskozity tekuté pryskyřice musí být užito gravitačních nebo odstředivých sil pro vyčištění [1].

SL díly požadují po stavbě některá manuální dokončení, jako odstranění podpor, dále následuje vytvrzení ultrafialovým světlem (UV) které vytvrdí přebytky pryskyřice z obou venkovních stran dílu a v případě QuickCast™ i uvnitř dílu. QuickCast™ díly použité pro vytavitelné lití požadují některé následné dokončovací práce jako vyhlazení drsných ploch a ostrých hran a také vyčištění kapaliny zevnitř [1].

QuickCast je vhodný pro výrobu jednoduchých i složitých kovových dílů rozličných tvarů. Přesnost modelu, který je vyroben na stereolitografu se pohybuje v setinách milimetru [22].

Díky těmto výhodám QuickCast našel uplatnění nejenom v mnoha průmyslových a spotřebních odvětvích, ale i v náročnějších oblastech. Důkazem tomu je i použití této technologie v oblasti náročné na přesnost, a to v medicíně.

QuickCast se zde používá se při výrobě koleních a kyčelních náhrad. Podstata metody spočívá ve vyrobení master modelu přímo z 3D dat. Tato data potřebná pro výrobu stereolitografického modelu jsou získávána z CT lékařského tomografu, který do paměti ukládá matematický popis řezů pevné a měkké tkáně. Model kolenní náhrady z pryskyřice vyrobený QuickCastovou technologií má speciální strukturu, která podporuje formování do keramické směsi a následné vytvrzení. Má speciální voštinovou strukturu, která zajišťuje vysokou pevnost modelu a při vytvrzování skořepiny jednoduše vyteče. Do vytvrzené keramické skořepiny je poté možné odlít příslušný kov (většinou se jedná o titanové slitiny) a vyrobit tak finální, kovovou náhradu. Celý proces výroby náhrady je realizován ve velmi krátké době (maximálně 2-3 týdny). Metoda QuickCast je velmi výhodná pro kusovou až nízkosériovou produkci. Nevýhodou je poměrně vysoká cena modelu určená cenou pryskyřice a cenou vlastního softwaru [22].

Druhou alternativou pro výrobu modelů je vstřikování vosku do pevných forem. Nejjednodušší a nejrychlejší je výroba stereolitografických dutin, do kterých je možné přímo vstřikovat tekutý vosk. Na stereolitografu je vyrobena negativní skořepina modelu. Dutina spolu se systémem chlazení je umístěna do rámu a zalita speciální pryskyřicí, která dobře vede teplo a umožňuje tak rychlé tuhnutí odlitého vosku. Po vytvrzení pryskyřice je možné do dutiny vpravovat vosk a vyrábět přímo voskové modely určené pro formování. Tato technologie je výhodná opět při požadavku zkrácení časové náročnosti a požadavku výroby prototypových dílů. Její nevýhoda je nutnost opatrnějšího pracovního procesu a nastavení jemnějších pracovních podmínek.

Alternativou k této metodě je technologie, která využívá vstřikování vosku do pevných epoxidových forem. Výchozí pro tuto technologii je opět stereolitografický master model, který je vyleštěn a povrchově upraven podle požadavků. Do jedné části rámu je instalována polovina modelu, který je rozdělen podle dělicí roviny. Obě poloviny stereolitografického modelu jsou zality speciální směsí pryskyřice a kovového plniva. To má důležitou funkci zlepšení mechanických a tepelných vlastností formy. Po vytvrzení pryskyřice je stereolitografický model z obou polovin vyjmut a vzniklá dutina tvoří formu připravenou k použití na vstřikolise. Proces vstřikování probíhá na automatických vstřikolisech pro sériovou výrobu, respektive na ručních vstřikolisech pro kusovou a malosériovou výrobu. Metodu je možné použít i v případě výroby jaderníku, pro směs používanou ve slévárnách při výrobě jader určených k přímému formování do písku [22].

Firma 3D Systems, Inc používá pro své SLA zařízení materiál Accura[®] 45HC Plastic, který je vhodný pro technologii QuickCast.

Další technologií RP nacházející uplatnění v oblasti lití na vypařitelný model je technologie SLS. Firma EOS používá pro své SLS zařízení materiál PS 2500(polystyrén). Polystyrénový model se případně nasytí voskem a dále se s ním pracuje jako s voskovým modelem. Výhodou této metody spočívá v lepších mechanických vlastnostech polystyrenu a možnosti vyrobit model mnohem větších rozměrů a tvarové složitosti při velmi dobré pevnosti a tvarové stálosti [21].



Obr.31: Modelu z polystyrénu PS 2500 [10]

Technologie FDM je další metoda RP, která nachází uplatnění v oblasti lití na vypařitelný model. Přímé užití ABS dílu pro tvorbu keramické skořepiny je vhodné pro požadavek vyrobit pouze několik odlitků. Už v přípravné fázi úpravy 3D dat odpadá tvorba úkosů. Díly zhotovené v 3D tiskárnách a výrobních systémech firmy Stratasys mohou obsahovat drobné detaily a komplexní vnitřní geometrii, která je díky WaterWorks technologii snadno realizovatelná. Další výhodou je pevnost materiálu ABS modelů z hlediska zhotovení tenkých stěn a detailů dílu. Modly jsou také mnohem více odolné proti poškození při transportu dílů do provozů sléváren. Materiál ABS má velmi malý koeficient teplotní roztažnosti, což má pozitivní vliv na kvalitu keramické skořepiny a následnou kvalitu odlitků. Navíc technologie stavby modelu na zařízeních firmy Stratasys umožňuje zhotovení ABS modelu s řídkou vnitřní strukturou, a tak se může nejen minimalizovat čas stavby, ale i eliminovat teplotní roztažnost modelu. Proces zhotovení skořepiny na základě ABS modelu však vyžaduje postup, který je odlišný od standardního užití (v případě užití voskových dílů), což je stále důvodem pro jeho větší rozšíření [6].

6 VYUŽITÍ METOD RP PRO PŘÍMÉ ZHOTOVENÍ TRVALÉ FORMY

Technologie lití do trvalých forem má poměrně dlouhou historii, neboť již v dávnověku přišli slévači na to, že je pracné pro opakovanou výrobu zhotovovat znovu netrvalou formu. První trvalé formy, např. pro odlévání prstenů, vznikly vyškrabáním tvaru odlitku do pískovce nebo později vytesáním do kamene. Byly to většinou formy otevřené, protože bylo velmi obtížné opracovat přesně dělicí plochu u několikadílných forem [7].

Kovové formy (kokily) mohou být dělené a nedělené s horizontální nebo vertikální dělicí rovinou. Do kovových forem lze vyrábět i duté odlitky. V tomto případě se do formy zakládají buď písková jádra nebo u jednoduchých dutin jádra kovová [7].

V oblasti přímé výroby trvalé formy(kokily) nachází uplatnění řada RP metod. Metody je možno rozdělit do tří hlavních skupin:

- první skupinu tvoří metody, kde je geometrie kovové formy vytvořena ve stavěcí komoře (vyplněné práškovým materiálem) za působení účinku laseru, jak byla vysvětlena v kapitole 2.2. [5]

- druhou skupinou tvoří metody, kde je roztavený materiál postupně nanášen do aplikovaného místa [5].

- třetí skupinou jsou metody pracující na dalším jiném principu.

Metodami je možné optimalizovat chlazení forem na plasty vhodně zakřivenými chladicími kanály (conformal cooling), tzn. optimalizovat cyklus vstřikování. Metody postupného nanášení kovového materiálu je možné aplikovat při opravě kovových forem nebo velkých dílů.

Následně jsou uvedeny některé metody založené na laseru, které staví kovový díl v komoře vyplněné práškovým materiálem [5].

Direct Metal Laser Sintering

DMLS německé firmy EOS GmbH nabízí zařízení EOSINT M250 Xtended (CO₂ laser) a EOSINT M270 (fiber laser), které mají dobrý detail a dobrý stavěcí výkon. V širokém spektru nabízených kovových materiálů nechybí nerez ocel, titanové slitiny a kobalt-chrom slitiny [5].

Selective Laser Melting

SLM německé firmy MCP HEK Tooling GmbH, www.mcp-group.de/tool/to_fr.htm nabízí zařízení Realizer II SLM, které je vybaveno výkonným infračerveným laserem se schopností realizovat detaily 80 mikronů. Nabízí se nerez ocel, titan, kobalt-chrom slitiny, hliník, měď a zlato [5].

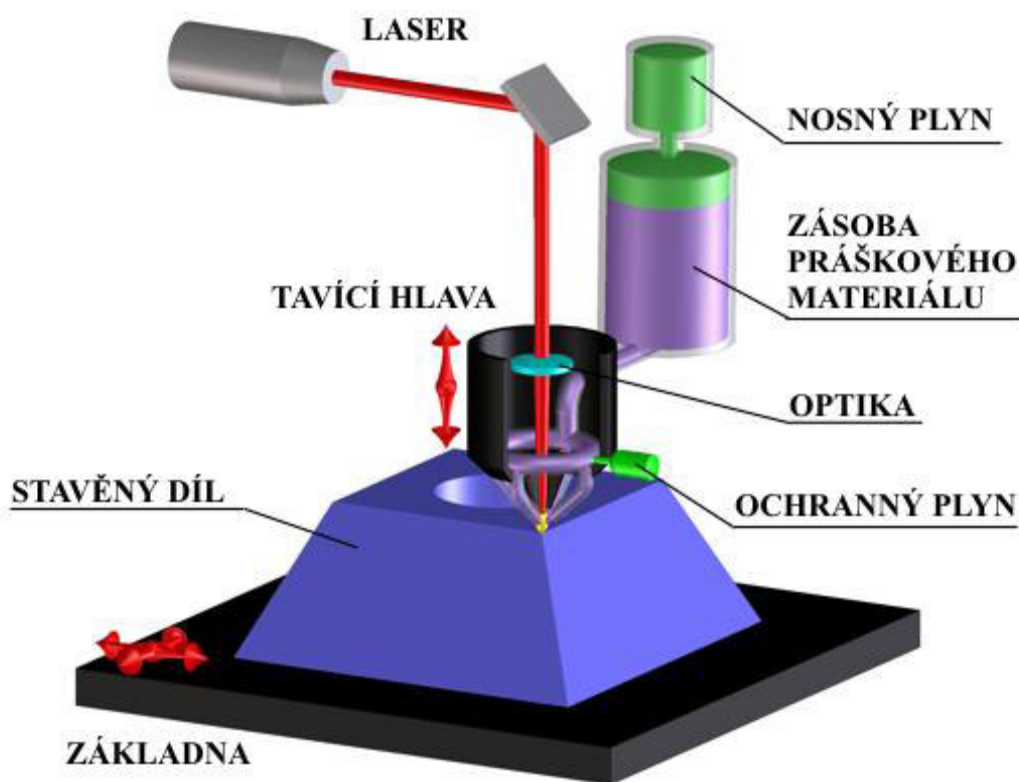
Selective Laser Sintering

SLS je proces americké firmy 3D Systems, která nabízí zařízení Sinterstation Pro. Laser roztaví pojivo obsažené v kovovém prášku a vytvoří „zelenou součást“, která se následně v tavící komoře zbaví pojiva, roztaví kovový prášek a napustí bronzem. K dispozici je nástrojová ocel a nerez ocel [5].

Některé z metod umožňující nanášet kovový materiál jsou založeny na metodě LENS.

Laser Engineering Net Shaping

LENS metoda umožňuje získat plně homogenní strukturu kovového dílu s výbornými metalurgickými vlastnostmi. K tomuto procesu dochází v uzavřeném prostředí nanášecí hlavy, kde je do malého místa přes optiku koncentrován výkonný laser. Za pomoci stlačeného plynu je přiváděn kovový prášek aplikací laseru roztaven a nanášen přes trysku do aplikovaného místa. Takto zhotovené díly nevyžadují další tepelné zpracování a mohou být přímo užity pro výrobu a opravu nástrojů např. pro vstřikování plastů nebo pro opravu dílů z titanu pro letecký průmysl. Nanášecí hlava většinou vykonává vertikální pohyb, a ta definuje jednotlivé vrstvy. Stůl pak realizuje pohyb v rovině x-y [5].



OBR.32: Schéma technologie – LENS [5]

Aplikace nanášení se realizuje nanášecí hlavou nebo je k nanášení využít 5-osý mechanismus robota. Tato technologie byla vyvinuta na Sandia National Labs a je nabízena firmou Optomec Design, Corp [5].

Direct Metal Deposition System

DMDS americké firmy Optomec Design Corp. nabízí na základě LENS metody systémy LENS750 a LENS850, které zpracovávají materiály jako titan, nerez, ocel a hliník. Použití je v lékařství, leteckém průmyslu a pro opravy nástrojů [5].

Direct Metal Deposition

DMD americké firmy POM-Group www.pomgroup.com je založena na obdobné technologii a nabízí systém DMD 505, který zpracovává široké spektrum materiálů jako je např. nástrojová ocel, hliník a titan. Od roku 2003 spolupracuje s firmou Trumpf, která nabízí systém na evropském trhu. Systém je vybaven 5-osým polohovacím mechanismem a je využíván pro opravu nástrojů a opravu tvarově složitých dílů v letectví (např. lopatek turbín) [5].

Následně jsou uvedeny metody založené na jiném principu [5].

Elektron Beam Melting

EBM je technologií nabízenou švédskou firmou ARCAM AB www.arcam.com. Technologie se podobá metodě laser sintering zpracovávající kovový prášek, ale na rozdíl od této metody je místo laseru užit elektronový paprsek [5].

ProMetal

PM je americká firma, která je držitelem licence 3DP pro oblast kovových materiálů. Selektivně vstřikuje pojivo do kovového prášku, který se postupně po vrstvách spojuje ve výslednou součást. Následně je součást v tavící peci sintrována a infiltrována. Zařízení R1 a SR2 umožňuje zpracovat slitiny oceli, mědi, wolframu a niklu. Stavba dílu je produktivní, ale je nutné počítat s časem pro následný sintering a infiltraci [5].

7 ZÁVĚR

Metody RP procházejí v současné době bouřlivým vývojem. Tento vývoj je především zaměřen na:

- výrobu prototypů a dílů se zlepšenými mechanickými vlastnostmi
- snížení ceny dostupných zařízení
- zvýšení rozměrové přesnosti vyráběných součástí
- zrychlení vlastního výrobního procesu
- snížení možnosti vzniku chyb

Technologie Rapid Prototyping nacházejí uplatnění v mnoha průmyslových oblastech. Dostupnost RP zařízení je v současnosti velmi vysoká. Aplikací metod RP do procesu výroby prototypových odlitků nachází mnohá uplatnění.

V oblasti výroby netrvalých forem lze využít technologie LOM,FDM,LS. Vzhledem k finančně náročným LS zařízení sloužícím k výrobě trvalého modelu je využití této technologie spíše ojedinělé. Technologie 3DP a LS se zejména uplatňuje k přímé výrobě netrvalých forem (skořepin), kde je výhodou zejména absence matečného modelu. Technologií FDM můžeme využít na zhotovení trvalého modelu. Model vyrobený technologií FDM je vhodné před zaformováním dodatečně povrchově upravit. Další z technologií nacházejících uplatnění ve výrobě trvalých modelů je technologie LOM. Výhodou této technologie je rychlost výrobního procesu. Nevýhodou je velké množství vznikajícího odpadu.

V oblastech technologie lití na vytavitelný model nachází uplatnění RP technologie Inkjet. Tato technologie slouží k přímé výrobě voskových modelů. Využívá se především na modely zubních implantátů a bižutérii. Modely vyrobené technologií SLA,FDM,LS,LOM, mohou být dále zality do silikonového kaučuku. Do vzniklé dutiny lze poté odlévat voskové modely. Životnost těchto silikonových forem je ale omezena. Vhodné je použít tento postup pro malou sérii např. prototypových odlitků. V oblasti technologie lití na vypařitelný model nachází uplatnění zejména technologie SLA,LS,FDM. Nejznámější je použití technologie Quickcast. Modely vyráběné těmito technologiemi je možno získávat v řádu několika hodin až dnů.

Pro výrobu trvalých forem (kokil) je možné využít některé z RP technologií. Vzhledem k prototypové výrobě několika kusů je použití těchto metod velmi finančně náročné a ojedinělé.

Technologie RP přispívají k rychlému a efektivnímu zhotovení prototypových odlitků zejména v etapách vývoje.

Seznam použitých zdrojů:

- [1] TROMANS, Graham. *Developments in Rapid Casting*. 1. vyd. Bury St Edmunds And London: Professional Engineering Publishing, 2003. 131s. ISBN 1 86058 390 3.
- [2] HORÁČEK, M., aj. *Rychlé voskové modely získané použitím technologií RP a silikonové formy*. Slévárenství. Září 2008, roč. LVI, č. 9-10, s. 398-404. ISSN 0037-6225

Elektronické zdroje:

- [3] MM publishing s.r.o., *Technologie Rapid Prototypingu* [online].
URL:<<http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-rapid-prototypingu>>
cit.[2009-04-29]
- [4] ŘASA, J., aj. *Nekonvenční metody metody obrábění 9. díl* [online].
URL:<<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil>> cit.[2009-04-30]
- [5] DRÁPELA, Miloslav. *Modul Rapid Prototyping* [online].
URL:<<http://www.vu.vutbr.cz/digidesign/Moduly/Rapid%20Prototyping%20-%20Ing.%20Milosvav%20Dr%C3%A1pela.pdf>> cit.[2009-04-17]
- [6] FORTUS 3D Production Systems - *Stratasys, Inc.* [online].
URL:<http://www.fortus.com/uploadedFiles/Nort_America/Resources/Applications/Files_Applications/Sandcasting%20Using%20FDM.pdf>
cit.[2009-04-17]
- [7] ELBEL, Tomáš. *Základy slévárenské technologie od historie po současnost* [online] URL:<http://fmml10.vsb.cz/632/zaklady_slevarenske_technologie.pdf>
cit.[2009-05-02]
- [8] PK model s.r.o - *3D printer* [online] URL:<<http://pkmodel.cz/3Dprinter.html>>
cit.[2009-05-12]
- [9] ŘASA, J., aj. *Nekonvenční metody metody obrábění 10. díl* [online].
URL:<<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil>> cit.[2009-05-16]
- [10] EOS GmbH [online] URL:<<http://www.eos.info/en/products/plastic-laser-Sintering/eosint-p-390.htm>> cit.[2009-05-12]
- [11] Vokurkaz, *Lití metodou spalitelného modelu* [online]
URL:<<http://www.volny.cz/Vokurka/str2.jpg>> cit.[2009-05-09]
- [12] EOS GmbH [online] URL:<<http://www.eos.info/en/products/plastic-laser-Sintering/eosint-p-730.htm>> cit.[2009-05-12]

- [13] Technický Týdeník. *Laser 3D tisk* [online]. cit.[2009-05-15]
URL:< <http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=4596&mark>>
- [14] EOS GmbH [online] URL:<<http://www.eos.info/en/products/plastic-laser-sintering/materials.html>> cit.[2009-05-19]
- [15] EOS GmbH [online] URL:<<http://www.eos.info/en/products/sand-laser-sintering.html>> cit.[2009-05-20]
- [16] EOS GmbH [online] URL:<http://www.eos.info/fileadmin/download/literature/EOSINT_S_750_EN_0803.pdf> cit.[2009-05-20]
- [17] ProMetal RCT GmbH [online] URL:<http://www.prometal-rct.com/fileadmin/Downloadarea/S15_LOW_DE_01.pdf> cit.[2009-05-23]
- [18] Castle Island Co. *Worldwide Guide to Rapid Prototyping* [online]
URL:<<http://home.att.net/~castleisland/bpm.htm>> cit.[2009-05-01]
- [19] 3D Systems, Inc. *Accura® SL Materials*. [online]
URL:<<http://www.3dsystems.com/products/materials/sla/accura10.asp>>
cit.[2009-05-13]
- [20] 3D Systems, Inc. *Accura® SL Materials*. [online]
URL:<<http://www.3dsystems.com/products/materials/sla/accura45hc.asp>>
cit.[2009-05-13]
- [21] Hacker Model Production a.s. *Rapid Prototyping*. [online]
URL:<<http://www.hacker-model.com/rapidprototyping/rproto.htm>>
cit.[2009-05-17]
- [22] 3D Tech, spol. s r.o. *Stereolitografie ve slévárenství*. [online]
URL:<<http://www.3dtech.cz/default.asp?language=cs§ion=12>>
cit.[2009-05-24]
- [23] Solidscape, Inc. *T612 Benchtop Product Description*. [online]
URL:<<http://www.solid-scape.com/t612.html>> cit.[2009-05-25]
- [24] Soligen, Inc. *How DSPC Works*. [online]
URL:<<http://www.soligen.com/about/howdspc1.shtml>> cit.[2009-05-25]
- [25] Soligen, Inc. *Photos of DSPC Demo Ceramic Mold*. [online]
URL:< <http://www.soligen.com/parts/demomold.shtml>> cit.[2009-05-23]
- [26] MCAE Systems s.r.o., [online]. URL:<http://www.mcae.cz> cit.[2009-05-27]
- [27] Solidscape, Inc. *R66 Product Description*. [online]
URL:< <http://www.solid-scape.com/r66.htm>> cit.[2009-05-20]